

テッポウエビを用いた海域環境のモニタリング

渡部守義¹・関根雅彦²・濱田悦之³・浮田正夫⁴

¹学生員 工修 山口大学大学院理工学研究科博士後期課程 (〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

²正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

³農博 東京水産大学教授 海洋生産学科 (〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7)

⁴正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

本論文では、海中発音生物として知られるテッポウエビの発音数観測による浅海域底層環境モニタリングの可能性を、環境汚濁として貧酸素水塊を取り上げ検討した。発音数の測定は基本的にはハイドロフォンで水中音響を録音するだけであり、生物の専門知識も必要なく1~2分で終了する。2年間の現地調査、室内実験の結果、遊泳能力を持たないテッポウエビにとって貧酸素水塊発生は危機的な状態であり、パルス数が激減すること、環境汚濁の無い状態では水温が発音数の支配要因となることを見出した。また、環境汚濁や急激な水温変化がなければ短期間でのパルス数の変動はほとんどないことから、定点モニタリングでは十分にテッポウエビのパルス数観測が環境汚染の生物影響の直接的な測定方法となることを示すことができた。

Key Words : snapping shrimp, bioassay, acoustic monitoring, oxygen deficient water

1. 序論

近年、港湾の整備などに伴う沿岸域の埋立や浚渫、洋上空港の建設、人工島の建設など多くの土木工事が行われている。これらの開発により周辺海域に何らかの海岸や海底形状などの環境変化が生じることは避けがたいことである。その変化がある限界を超え、生態系に重大な損傷を与えたり、その崩壊を招くようであってはならない。特に閉鎖的な海域にあっては死水域を形成し、それにとりもなう水質、底質への影響が広範囲に及び、重大な影響をもたらしている。その環境の変化にとりもなう生態系への影響を効果的に把握するためには、海洋生物を利用したモニタリングが有効である。ところが、水中生物量の推定は容易ではない。漁獲量は漁具や漁獲努力量に大きく左右されるし、採取を基本とした既存の底生生物の調査法では底泥採集からソーティングまで含めると多大な時間と労力、専門知識が必要である。このため、従来の環境調査では、汚濁物質濃度や溶存酸素など物理化学指標が測定されることが多く、生物量や生物活性そのものが測定されることはきわめて少なかった。

ところで、海中には発音生物が存在する。発音生物はその種類も多いが、発音の目的も様々である。「グチをこぼす」という言葉があるように、グチの発音は良く知られている。グチの発音は腹腔壁にある特別な筋肉を振動させて音を出し、浮袋で共鳴増幅させる。それ以外にも、浮袋で共鳴増幅させる発音生物としては、ホウボウ、イ

サキ、カサゴ、ハゼ、クマノミなどがある。フグも発音で知られている。摩擦により音を出す生物としては、大きなはさみでパチパチと跳ねるような音を出すテッポウエビ、触角の根本にあるヤスリ状のものを摩擦して発音するイセエビ、胸びれを振動させて音を出すギギがある。また、遊泳音および捕食音等を出す魚は、イカ、ハマチ、サバ、ウミタナゴ、カワハギなどがある。イルカやクジラは、コミュニケーションのために可聴音と超音波を発生している¹⁾。これらの発音生物の発する音を観測することで、比較的簡単に広範囲にわたる生物の生態や分布状況を調査することができる可能性がある。

筆者らは、これら発音生物の中でも50m以浅の海中に普遍的に生息し、天ぷらノイズと呼ばれる独特のパルス音を出すテッポウエビ属(*Genus Alpheus*)に注目した¹⁾。テッポウエビに関しては、漁獲価値の低さもあり国内外とも研究自体が少ないのが現状である。生態学、分類学上の研究以外には、パルスを発する理由に関する研究や、潜水艦の聴音機との関連で軍事的な研究などが見受けられる程度であるが、テッポウエビの社会性に関する研究はNature^{2), 3)}に掲載されるほど注目されている。

テッポウエビ属は世界中で220種以上、日本においても約60種が確認されている⁴⁾。40°S~40°Nの広範囲の海域に分布し、砂地などに複雑な形のトンネルを掘り雄雌ペアで生活している。一般的には浅いところほど個体群の密度が高く、一地点における個体密度の変化は年間を通して大きくないと考えられている¹⁾。産卵期は種類を問

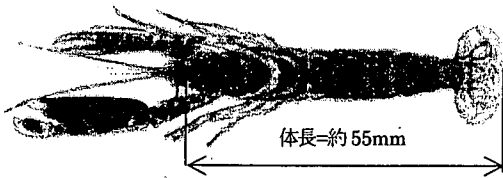


図-1 テッポウエビ属オニテッポウエビ

わず長期間で、盛期が異なる。テッポウエビの発する独特のパルス音は高周波であり、自然生物の中で他に相当するものはない。また季節的变化あるいは日周変化がほとんどなく、ほぼ一定なレベルを維持しているとされている⁵⁾。発音の目的は、敵対者に対する威嚇や防御、あるいは捕食をおこなうために相手を驚かすためであるとされている^{6), 7)}。またハゼと共生することでも知られる⁸⁾。図-1 に日本近海で多く分布するテッポウエビ属オニテッポウエビを示す。

本論文は水域の生物環境を簡易にモニタリングするためのテッポウエビを用いた手法の確立を目指すものである。海中発音生物を指標種とする場合、観測場所と時期にほとんど制限がないとされているテッポウエビは最適である。海域において、なんらかの環境変化によりその生息数が変化した場合、水中録音により発音数の変化を調査するだけでその影響を知る事ができると予想されるからである。本研究ではこれらの考えに基づき、貧酸素水塊の発生を例にとりてテッポウエビによる環境モニタリングの可否を検討した。

2. 実海域における発音数変動調査

(1) 調査方法と発音数計数方法

テッポウエビ音の録音には、水中録音用のハイドロフォン（沖電気製 TA-101）と DAT（SONY 製 TCD-D8）を用いた。船を用いる場合は図-2 に示すように調査地点で投錨し、船のエンジンを停止した後、水深の測定に続いてハイドロフォンにて水底から 1 m 上部の位置で約 2 分間水中録音をおこなった。陸上からの場合は直立護岸などで水深を測定した後、船を用いた場合と同様に水中音響の録音をおこなった（図-3）。また録音時は船舶の往来による騒音を避けるように留意した。

パルス数（1 分間あたりの発音回数）の計測には 2 分間中の 1 分間の録音データを用いた。録音したデータは Creative Technology 製 AD 変換器（SB16CQA）と波形解析ソフト（Syntrillium 製 Cool Edit version 1.51）を用いて 44100Hz, Channels: mono Resolution: 16-bit でコンピュータに読み込み、WAV ファイル形式とし、さらにテッポウエビのパルスの周波数帯が 2~9kHz⁹⁾ あることから Cool Edit により 2~9kHz のフィルターをかけて保存した。

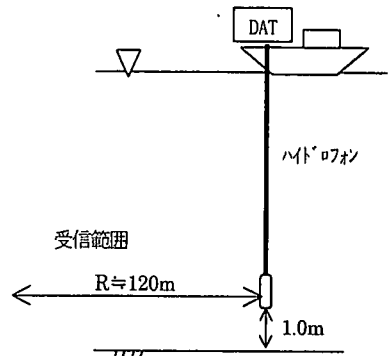


図-2 船舶による録音方法

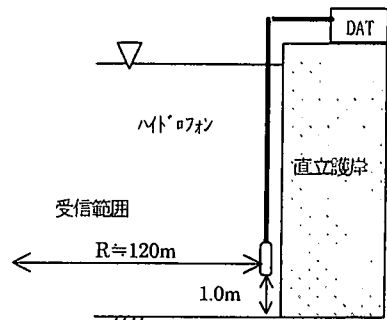


図-3 陸からの録音方法

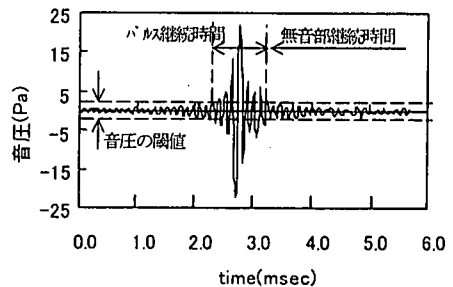


図-4 テッポウエビのパルス音の波形

テッポウエビ音の 1 個のパルスの波形を図-4 に示す。録音したテッポウエビ音の単位時間当りのパルス数（回/分）は、パルス計数プログラム（C++言語）を作成し計数をおこなった。パルスの判定には音圧の閾値、パルス継続時間、無音部の継続時間の 3 つのパラメータを用いた。テッポウエビのパルス音の継続時間はおおよそ 1 msec であることが調べられている⁹⁾。プログラムでは音圧が 4.7Papp（正の最大値と負の最大値の間の幅であるピーク・トゥ・ピーク値）を超え、その継続時間が 0.6 msec 以上続き、再び音圧が 4.7Papp を下回り、無音部の継続時間が 0.5 msec 以上続くとパルス終了と見なし 1 個のパルスとして計数する。またパルス音が複合している可能性を考慮し、パルスの継続時間 PL が 1.2 msec より長いもの

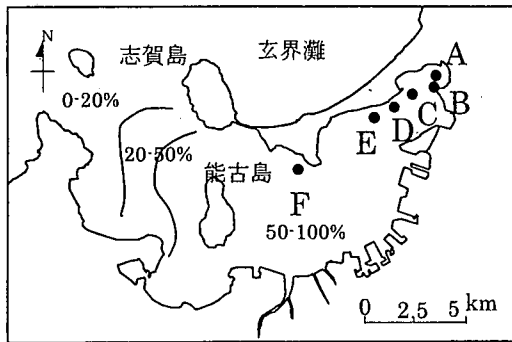


図5 博多湾調査地点および泥分率

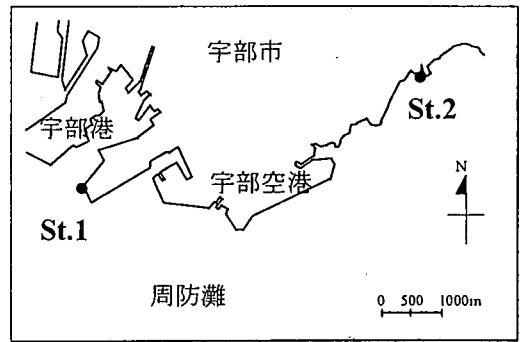


図6 宇部港調査地点

については、複合している時間をパルスの継続時間 T_p の4割と仮定し、その時間を加えたパルス継続時間を T_p で除した値をパルス数 P_n とした。

$$P_n = (PL + (T_p \times 0.4)) / T_p \quad (1)$$

パルス計数プログラムから出力する値は、パルス数(回)、音圧の閾値を越えた全てのパルス数(回)、パルス音継続時間の平均値(sec) およびその標準偏差、各パルスの最大値の平均値(パルス波形データ値) およびその標準偏差である。

(2) 調査海域

近年貧酸素水塊発生が報告されている福岡県の博多湾において、貧酸素水塊発生を中心とした水質変化が生態系に与える影響を調査した。また、これと比較するために貧酸素水塊など急激な水質変化が起こらない海域として山口県の宇部市近海にて年間を通じたパルス数の変動の調査をおこなった。

a) 博多湾調査

博多湾は背後に位置する福岡市の人口増加にともなって、海域に有機物の汚濁負荷も多くなり、プランクトンの異常増殖による赤潮が多発するなど、海域環境の変化は著しい。調査地点は図-5 に示す湾奥部5地点(A, B, C, D, E)と湾中央部(F)の計6地点とした。湾奥部は夏期になると貧酸素水塊が発生する地点であり、湾中央部のF地点は年間を通じて比較的水質が良好で湾奥部の比較対照地点として選定した。また、調査地点の底質²⁾は泥分率50~100%となっている。現地での錨に付着した底泥の状況から湾奥部の底質はほぼヘドロであり、F地点の底質は砂や岩と判断される。

調査は1996年6月から1997年6月までほぼ毎月1回おこなった。パルス数調査と同時に水質データとして表層から底泥直上まで鉛直方向50cm間隔の溶存酸素濃度(以下DO)、塩分、水温をマルチ水質ロギングシステム3800

(YSI製)を用いて測定した。

b) 宇部港調査

調査地点は夏期に貧酸素などの影響を受けない海域で、干潮時でも継続調査可能であることを考慮し宇部市近郊の埠頭や防波堤など十分な水深が確保できる図-6 に示す2地点を選定した。St.1は宇部港芝中西埠頭に沿った岸壁で外海に面している。そのため潮流は比較的速度く、風も強いことが多い。調査地点にある埠頭は大型船舶が停泊でき、水深は干潮時でおおよそ7mとなっている。底質は砂地でありテッポウエビの生息場としては適当であると考えられる。St.2は床波漁港内の防波堤で漁港入り口を調査地点とした。水深は干潮時でおおよそ1.5mほどで、底質は石、砂地である。

水質測定はバンドーン採水器により録音位置で採水し、これを用いて現場で溶存酸素濃度、pH、水温(水温測定は1997年8月以降から開始)の測定を録音直後におこなった。St.1ではさらに次に示す測定の時間スケールを変えた調査をおこなった。

経月調査は年間のパルス数の変動の傾向を調べるため、毎月第2週の火曜日の13:00~15:00の間におこなった。1週間調査は季節的な変化がない短期間内でのパルス数の変動を観測するためにおこなった。調査は降雨時を除いた合計7日間で13:00~15:00の間におこなった。24時間調査はパルス数の日周変動を調べるため24時間の間1時間毎におこなった。2時間連続調査はパルス数の瞬間的な変動の有無を確認するためにおこなったもので、2時間中の1分毎のパルス数を観測した。

(3) 調査結果

a) 水質

博多湾での湾奥部A地点と湾中央部F地点における表層と底層の水温、塩分、DOの推移を図-7から図-12に示す。以後、表層は水深50cmの位置、底層は海底から1.0m上部の位置と定義する。7月末にはわずかながら表層塩分の低下がみられるが、表層と底層の水温差はほとんどな

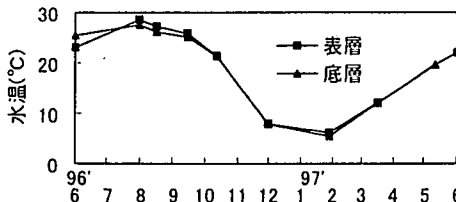


図-7 博多湾 A 地点の表層と底層の水温推移 (A 地点の平均水深 3.6m)

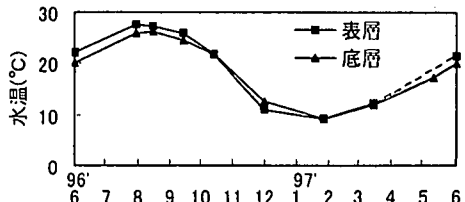


図-8 博多湾 F 地点の表層と底層の水温推移 (F 地点の平均水深 7.8m)

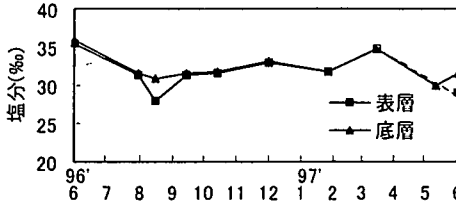


図-9 博多湾 A 地点の表層と底層の塩分推移

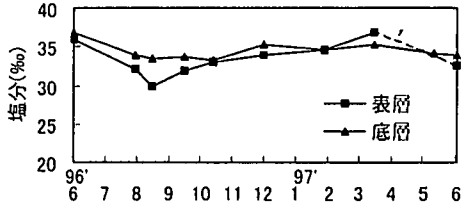


図-10 博多湾 F 地点の表層と底層の塩分推移

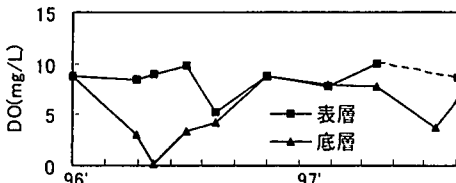


図-11 博多湾 A 地点の表層と底層の DO 推移

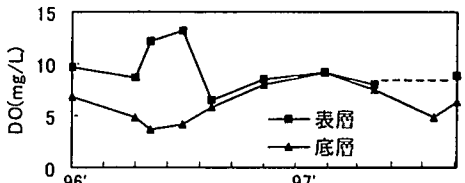


図-12 博多湾 F 地点の表層と底層の DO 推移

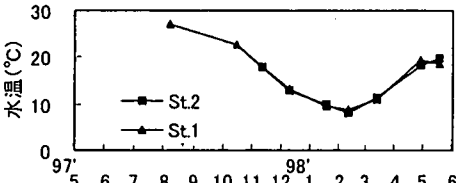


図-13 宇部港 St. 1, St.2 の底層水温推移 (平均水深 St. 1: 10.7m, St. 2: 2.7m)

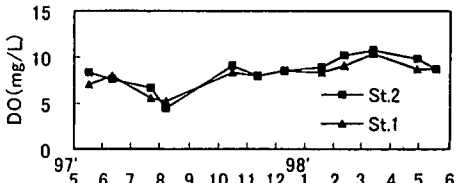


図-14 宇部港 St. 1, St.2 の底層 DO 推移

く成層は形成されていなかった。しかし 7 月末の湾奥部においては成層が形成されていないにも関わらず貧酸素状態となった。特に湾奥部の A 地点においては 7 月末に DO が 1.0mg/L 以下になっていた。翌月の 9 月にも湾奥部の底層では貧酸素状態であった。また高水温期には植物プランクトンのため表層の DO は過飽和であった。しかし夏期を除く季節には底層の DO は生物にとって良好な生息環境であった。

図-13, 14 に宇部港の水温と DO の推移を示す。St. 1, St. 2 両地点とも夏期に DO の低下がみられるが 3.0mg/L 以下になることはなく、博多湾調査と比較すると生物にとって良好な生息環境であると言えた。また調査時には赤潮等の発生はみられなかった。

b) 発音数

博多湾の 1996 年 6 月調査では、図-15 に示すようにパルス数は調査地点間で大きな値の差はあるが、湾内全体にテッポウエビが分布していることを確認することがで

きた。湾内のテッポウエビの分布は文献 9) の採取調査でも確かめられている。なお、この時点では定点を定めておらず、1996 年 6 月の F 地点のパルス数については、F 地点に最も近い測点の結果を用いた。1996 年 8 月は貧酸素の発生していない湾中央部 F 地点でパルス音が確認された以外では、ほとんどパルス音は確認できなかった。図-11, 12 に示す DO、図-16 に示すパルス数の推移から、DO の低下に伴うテッポウエビの発音数の減少が見られる。夏期に減少したパルス数は秋になると若干回復の傾向が見られるものの冬期に入ると一旦回復してきたパルス数が再び減少し、翌年 5 月、6 月になると再びパルス数の回復が見られた。この冬期のパルス数の減少は夏期にパルス数の減少のなかった湾中央部でも見ることができた。なお、図-5 の B~E 地点でも同様の結果が得られた。

宇部港調査の図-17 に示す経月変化では、夏期に St. 1 でパルス数の減少が見られるものの、宇部港では大規模な貧酸素は発生しておらず、博多湾湾奥部の貧酸素発生

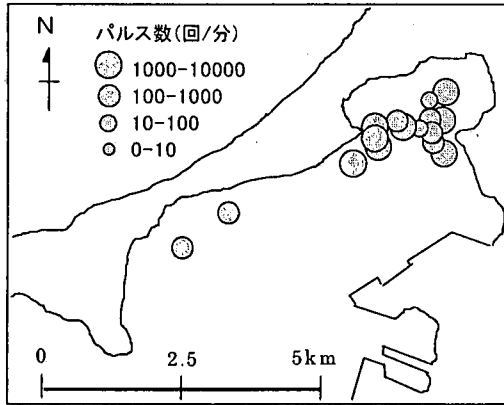


図-15 博多湾湾奥部を中心とした
1996年6月3日～5日のパルス数の分布状況

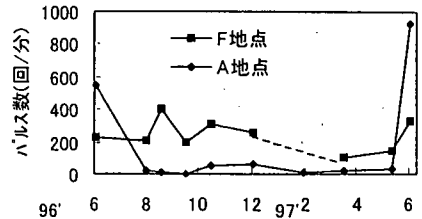


図-16 博多湾 A, F 地点のパルス数推移

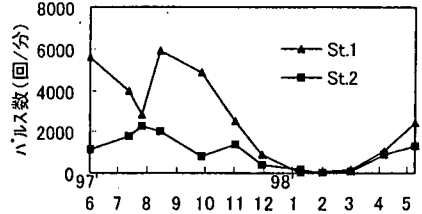


図-17 宇部港 St.1, St.2 のパルス数推移

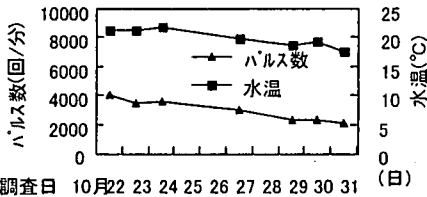


図-18 宇部港 St.1 の 97 年 10 月 22～31 日
のパルス数, 水温推移

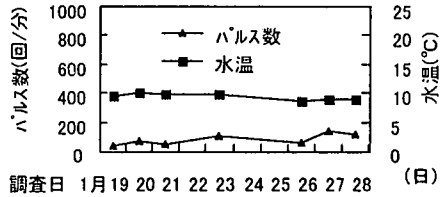


図-19 宇部港 St.1 の 98 年 1 月 19～29 日
のパルス数, 水温推移

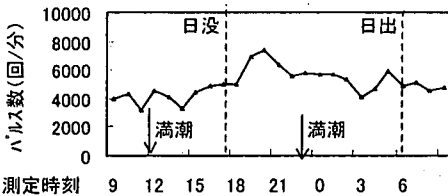


図-20 宇部港 St.1 の 97 年 10 月 7～8 日
の 24 時間のパルス数推移

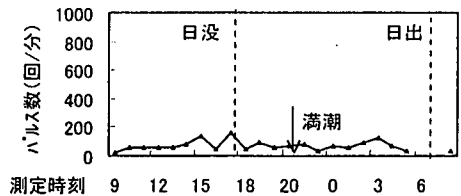


図-21 宇部港 St.1 の 98 年 2 月 10～11 日
の 24 時間のパルス数推移

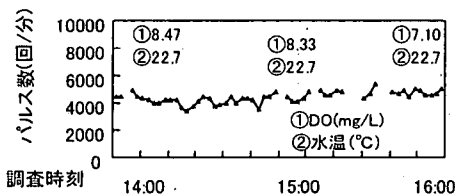


図-22 宇部港 St.1 の 97 年 10 月 7 日
の 2 時間のパルス数推移

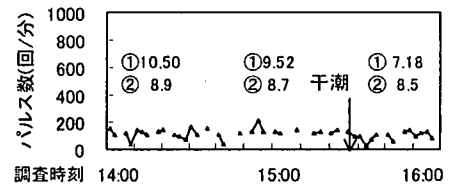


図-23 宇部港 St.1 の 98 年 1 月 20 日
の 2 時間のパルス数推移

時のような著しい減少は見られなかった。パルス数は冬期を除けば、St.1 で 5000 回/分前後、St.2 で 1000 回/分前後で推移していた。しかし冬期に入ると両地点において著しいパルス数の減少が見られた。

上記の結果のように博多湾、宇部港の両調査地点とも DO では生物にとって良好な生息環境にあるはずの冬期に、パルス数の減少が見られた。博多湾においては、この減少は夏期にパルス数の減少のなかった湾中央部でも見る

ことができた。

この他のパルス数変動の特徴として、図-18, 19 の 1 週間の調査結果より、1 週間程度の短期間における同時刻のパルス数の急激な変化はいと云える。また図-20, 21 に示すように、一日間のパルス数の変動はピークが日没前後におとずれること、特に図-20 では昼間に比べ夜間にパルス数が多いという傾向がみられた。文献 1), 7) には夜にテッポウエビの発音は増加すると述べられており、

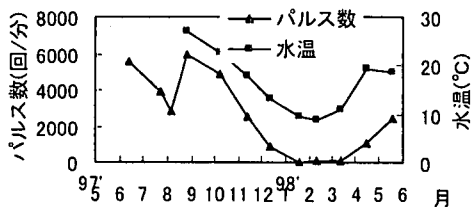


図-24 宇部港St. 1のパルス数と水温の推移

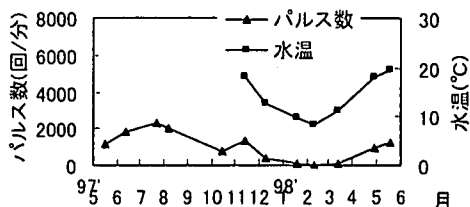


図-25 宇部港St. 2のパルス数と水温の推移

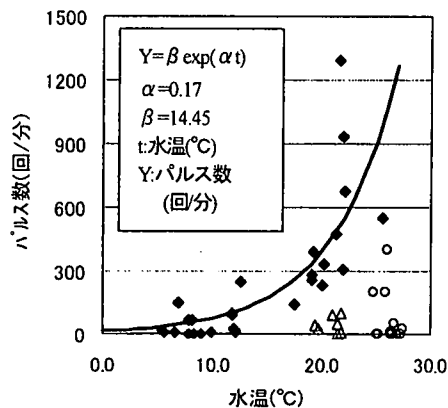


図-26 博多湾における水温とパルス数の関係

◆; 水質汚濁の発生していない時期のパルス数, ○; 貧酸素発生時パルス数, △; 調査時は貧酸素ではなかったが, 調査日前に赤潮などが発生した地点におけるパルス数, 曲線; 指数関数を仮定したパルス数の近似曲線

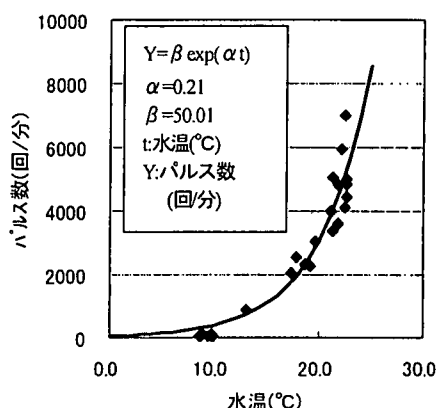


図-27 宇部湾における水温とパルス数の関係

◆; 水質汚濁の発生していない時期のパルス数, 曲線; 指数関数を仮定したパルス数の近似曲線

これと一致する結果であった。図-21でパルス数が低いレベルで推移するのは冬期の低水温が影響していると考えられる。また図-22, 23に示す2時間調査の結果では2時間内では急激なパルス数の変化は見られなかった。なお図中の破線は日出, 日没時刻を, 矢印は満潮, 干潮時刻をそれぞれ示している。

(4) 考察

宇部港における経月調査より, パルス数は季節変化し, 図-24, 25に示されるように, その変化は水温変化と相関が高いことが判明した。また, 宇部港における調査から, 短期間での急激なパルス数の変動が無いこと, 2時間のパルス数の変動が一日の変動に比べて小さく比較的安定して推移していることから, 比較的パルス数が変動しやすい夕刻をさければ, 2分間程度の録音調査でもその季節におけるパルス数の代表値が得られると判断した。統計手法を用いたより最適な録音時間の判定については今後の課題としたい。一方, 博多湾調査より, 貧酸素水塊発生がテッポウエビのパルス数を激減させることが判明した。

"生物の活性は水温の上昇とともに指数関数的に活発になる"とされている¹⁰⁾。そこで両港におけるパルス数と水温の関係をプロットし, 指数関数でカーブフィットさせ

ると図-26, 27のような結果が得られた。水質汚濁の発生していない時期のパルス数は, 博多湾, 宇部港とも指数曲線とほぼ一致していることがわかった。ところが博多湾では, 底層の水温が高く貧酸素状態にある場合のパルス数はこの曲線とは一致していない。また, 調査時の測定では貧酸素は認められなかったが, コンサルタントの調査員と船員から, 調査の2, 3日前に赤潮が発生していたとの情報を得た日のパルス数は減少していた。赤潮の発生と貧酸素水塊とは直接的な関係はないが, 湾内の水質汚濁状況や過去の貧酸素水塊の発生とパルス数の減少が関係している可能性が考えられる。

パルス数の変化要因としては, 個体数の変化と活性の変化が考えられる。また, 貧酸素により一旦減少したパルス数に速やかな回復が見られないのは, 貧酸素下では個体数自体が減少し, 個体の新規加入にある程度の期間を要することが原因であると思われる。

以上より, 定点調査においては, 水質汚濁の発生していない時期の水温とパルス数の関係を把握しておくことにより, 貧酸素水塊のような水質汚濁に起因するパルス数の変化を検出可能であると考えられる。博多湾では水深が浅く水温成層も弱い為, 風などの外力でたやすく貧酸素水塊が消失する。このため, 定期水質調査では貧酸素水塊の

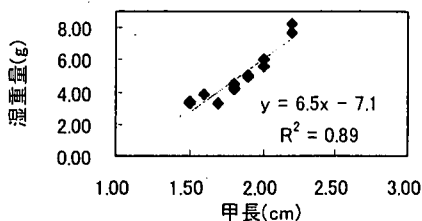


図-28 オニテッポウエビの甲長と湿重量の関係

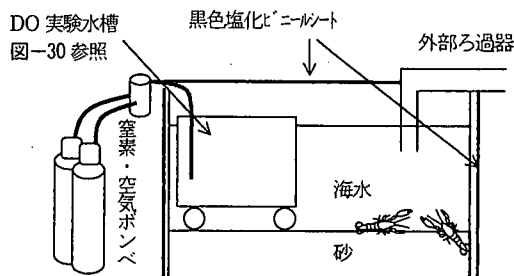


図-29 蓄養水槽ならびに溶存酸素耐性実験水槽の配置

発生は見逃されがちであった。そのような場合でも、一旦貧酸素にさらされたテッポウエビのパルス数の回復には1ヶ月以上かかるため、本手法を用いれば過去に発生した水質汚濁が検出できることになる。

なお、宇部港と博多湾ではパルス数が大きく異なることから、現段階では本手法を地点間の比較に利用することは難しいと考えられる。地点間の比較を可能とするためには、水深、底質など、パルス数に与える水温以外の環境条件の影響についてより詳細に検討する必要がある。

3. 指標生物としての有用性の検討

海域環境の指標生物とするためには、調査によって明らかとなった夏期の貧酸素水塊発生、冬期の水温低下による発音数の減少を実験により定量的に評価する必要がある。実験では貧酸素水塊がテッポウエビにおよぼす影響を定量的に把握するためにDOと硫化水素濃度に対する耐性実験をおこなった。また水温の低下がその個体とパルス数に与える影響を把握するために、水温を変化させた場合の活性実験等をおこなった。

(1) 実験方法

供試生物には、山口県宇部市沖で底引き網によって採集されたオニテッポウエビ（テッポウエビ科、以下単にテッポウエビと記す）を用いた。入手時期は1997年6月から翌年の2月にかけての計5回である。1997年6月のテッポウエビの甲長と湿重量の関係を図-28に示す。蓄養水槽（90cm×45cm×45cm）には、海岸砂を水道水で洗い乾燥した後に深さ20cmに敷き詰め、水槽の側面は黒いビニールにて遮光した。海水はSt.1で採水したものをを用い外部濾過器で浄化した。蓄養水槽を図-29に示す。蓄養水槽内の海水はクーラーとヒーターにより20℃に保った。蓄養中のテッポウエビは魚類に対する急性毒性試験法¹¹⁾に従い、テッポウエビは餌を与えず最低1週間馴致させて実験に供した。また個体差による誤差を少なくするため

実験毎に甲長が同程度のものを用い、左右のはさみのいずれかが欠落しているものについてはこれを用いないものとした。

入手直後のエビは弱った個体が多いためか、入手後3日間で3割ほどが死に至るが、その後はあまり死亡個体は現れなくなる。急激な環境変化あるいは水槽内に多数の個体が入り個体密度が高くなったためか、蓄養中の発音はほとんどみられなかった。時々威嚇行動をとったり、脱皮をしている個体がみられた。また投入した内径3.2φの灰色塩化ビニール管内には好んで入るようであった。

(2) 貧酸素水塊が個体に与える影響

a) 溶存酸素濃度に対する耐性

貧酸素水塊とは、ベントスの生存に強い影響を与えるDOが2.0mg/L以下の水塊のことで、0.2mg/L以下を無酸素水塊としている¹²⁾。貧酸素水塊は水域の富栄養化にともない湖、内湾、沿岸などで発生し、特に底層ならびに近底層に生息する水生生物の生存に強い影響を与えている。底生生物の貧酸素耐性の例としては、甲殻類の*Macrobrachium nipponense*（テナガエビ）は2.0mg/Lで生存率が低下し¹³⁾、*Theora lbrica*（シズクガイ）は5.0mg/L以下で生息密度が減少し、4.3mg/L以下ではほとんど出現しない。*Paraprionospio*（ヨツバナスピオ）は2.0mg/L以下の状態が2日間継続すると死滅する¹⁴⁾。*Capitella capitata*（イトゴカイ）は0.8-0.9ml/Lで13日間生存する。また、忌避行動をとる動物の例としては、*Swuilla empusa*（シヤコ）と*Callinectes sapidus*（アオガニ）は1.5ml/Lで移動を開始し、埋込動物の*Paraprionospio pinnata*（スピオ科の多毛類）は0.8ml/Lで遊泳する¹⁵⁾ことが報告されている。

テッポウエビの溶存酸素濃度に対する耐性試験を急性毒性試験法のTLm (median tolerance limit)¹¹⁾を求める方法に準じておこなった。これは一定時間毒性に曝露した後50%生存率を示す濃度を求めるものである。TLm値には48時間におけるものを採用し、24時間におけるものも

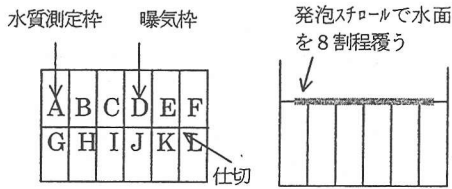


図-30 溶存酸素耐性実験水槽平面図、断面図

併記する。

実験水槽(35cm×22cm×23cm)は図-30に示すようにテッポウエビ同士の争いを避けるため、ビニール製のネットを用いて12に分割し、そのうち10個の枠についてはテッポウエビを投入し、1個はエアレーション用、1個は水質測定用の枠とした。実験水槽は図-29に示すように蓄養水槽中に設置し、実験中の水温は $20 \pm 0.8^\circ\text{C}$ 内であった。

DOの設定は窒素ガスと空気を混合したもの吹き込むことで調整をおこない、空気との接触面積を少なくするため、水面は板状の発泡スチロールで8割程度覆った。実験で設定したDOは0.0mg/L、1.0mg/L、2.0mg/L、3.0mg/L、7.0mg/Lの計5種類である。実験中のDOの変化は設定濃度 $\pm 0.2\text{mg/L}$ 以内であり、空間分布についてもAとLで最大0.13mg/Lの差と小さく、槽内は一樣な条件が保たれているものとした。実験では各設定について同時に実験する個体の数は10個体(甲長:1.85(SD=0.22)cm, 湿重量:4.95(SD=1.53)g)とし、馴致中、実験中は餌を与えず死体は発見次第これを除去した。生死の判定は個体に刺激を与えた時、全く反応を示さないとときし48時間以内に個体が全て死亡した場合はその時点で試験を終了した。また、供試体の極端な耐性の相違を考慮し、実験の最初と最後に死亡した供試体を除いたものを結果として取り扱うことにした。なお、一連の実験は、150尾程度まとめて蓄養した母集団から抽出したものをを用い、約2週間の間に集中しておこなった。この期間の母集団の死亡率は3尾/日程度で大きな変化は無く、一連の実験結果を直接比較することに問題はないと考えられる。

溶存酸素致死実験の結果を図-31、32に示す。テッポウエビの溶存酸素に対する48時間半数致死濃度はおよそ1.7mg/L、24時間半数致死濃度はおよそ0.8mg/Lであることが半判明した。

実験からDOが3.0mg/L以下になると48時間後の生存率が急激に低下し、1.0mg/L以下になると短時間で死亡することから、貧酸素水塊発生はテッポウエビにとって危機的な状態であることが確かめられた。

b) 硫化水素濃度に対する耐性

貧酸素水塊の発生する海域では、底質内における硫酸塩の還元に伴い硫化水素(H_2S)が発生することが少なくなく、貧酸素と同時に水生生物の生存に強い影響を与える

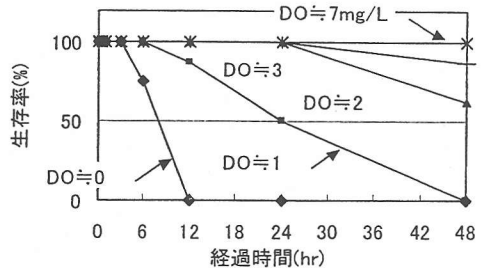


図-31 溶存酸素耐性実験各濃度に対するオニテッポウエビの生存率(%)

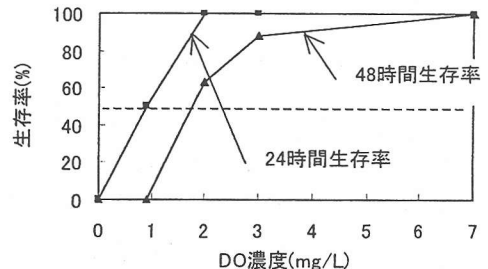


図-32 溶存酸素に対するオニテッポウエビのTLm値(48時間, 24時間)

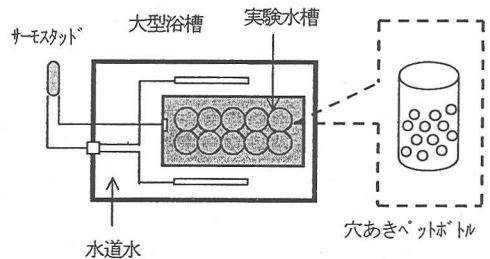


図-33 硫化水素耐性実験装置概要

とされている¹³⁾。

硫化水素濃度の設定は硫化ナトリウム($\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)溶液濃度の調節でおこなった。硫化水素濃度はSの重量濃度として $\mu\text{g S/L}$ で表現した。

実験装置を図-33、硫化水素設定濃度を表-1に示す。実験水槽(35cm×22cm×23cm)は、大型浴槽内に入れてサーモスタットとヒーター(200W:1個, 100W:1個)を用い水温を $20 \pm 0.3^\circ\text{C}$ に保った。実験水槽内には水が通過できるように十分に穴を開けたペットボトルを用いて10区間に分け一つのペットボトル内にテッポウエビを一個体入れた。また実験中は硫化水素が空气中に揮発するのを防ぐため水面はビニールで覆った。実験に用いる海水はDO約7.0mg/L、pHは8.0以上のものを用い、一実験に用いるテッポウエビは10個体(甲長:1.81(SD=0.13)cm, 湿重量:5.30(SD=1.40)g)とし、各設定濃度での死亡率を

表-1 硫化水素濃度設定

設定濃度 H ₂ S (μgS/L)	DO (mg/L)		pH	
	開始時	終了時	開始時	終了時
0	8.64	7.53	8.01	8.01
5000	7.37	2.94	8.01	8.25
10000	7.64	1.09	8.39	8.67
20000	7.6	0.62	8.23	8.99
40000	7.47	0.37	8.17	9.29

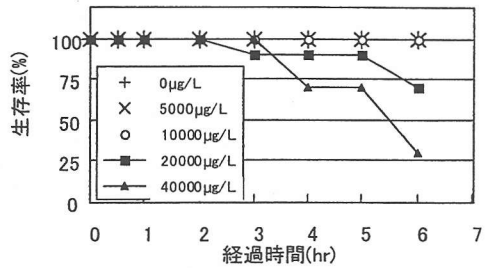


図-34 硫化水素各濃度に対する
オニテッポウエビの生存率(%)

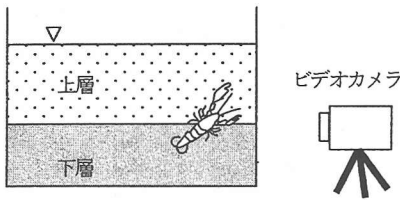


図-35 遊泳実験

表-2 遊泳実験の各層の設定条件

		DO濃度 (mg/L)	水温 (°C)	通常海水への NaCl添加 量(g/L)	水量 (L)
設定 1	上層	7.31	20	0	6
	下層	0.55	4	200	3
設定 2	上層	7.62	20	0	6
	下層	0.57	4	80	2.5

求めた。

実験結果を図-34 に示す。硫化水素濃度は、児島湖の冬期底層水中で発生した 10000 μgS/L¹³を参考にしたが、本実験において、硫化水素濃度 5000 μgS/L, 10000 μgS/L で 6 時間以内に死亡個体は現れなかった。硫化水素濃度 20000 μgS/L, 40000 μgS/L ではそれぞれ実験開始後 1 時間で DO が 0.62mg/L, 0.37mg/L の低酸素となり、硫化水素と貧酸素の複合状態となったが、それでも 2 時間以内での死亡個体は見られなかった。その後、硫化水素と貧酸素の複合条件下で徐々に生存率が低下していった。

本実験においては、実験中に DO も変化したため、H₂S の影響の定量的な議論は難しいが、DO がテッポウエビの生存可能なレベルを保っていれば、かなり高い H₂S 濃度でも H₂S 単独で急性の毒性が発現するわけではないと思われる。今後は貧酸素下での H₂S の複合影響について検討する必要がある。

c) テッポウエビの遊泳能力

貧酸素水塊発生は底生生物の生存に多大な影響を及ぼす。著者らのグループは、底生魚類のカレイは貧酸素水塊から忌避することを確認した¹⁶⁾。しかしベントスであるテッポウエビが貧酸素水塊の発生等に伴う生存の危機に直面した場合に逃避することが可能であるかは不明である。これを実験により確認することを試みた。

実験水槽(30cm×18cm×32cm)に、上層は St. 1 で採水した通常海水、下層は上層の海水を高塩分、低温、低 DO とした極端な成層条件を作り出し、テッポウエビが下層に

留まっておけないようにして、テッポウエビが上層で遊泳し続けるかどうか確かめた。生成海水の設定条件は表-2、実験装置は図-35 に示す。投入するテッポウエビは 1 実験につき 3 個体(甲長:1.78(SD=0.12)cm, 湿重量:4.67(SD=1.01)g)とし、ビデオ撮影により観察した。

初歩的で乱暴な実験方法ではあるが、同様の実験を着底性のあるカレイ稚魚に対して実施し、7 日以上継続して遊泳することを確認した経験¹⁷⁾から、遊泳能力を確認する実験としてある程度有効であると判断している。

実験中のテッポウエビの行動は、設定 1 では全ての個体が下層において数十秒間もがいた後で死に至り、逃避行動ならびに遊泳は行わなかった。設定 2 では 1 個体について逃避行動がみられたが、これは下層から上層へと跳躍を行い、また下層へ落ちてからまた跳躍するというもので継続的な遊泳は行わなかった。これを 15 秒間ほど繰り返した後、下層でもがいて死に至った。他の個体は逃避行動を行わなかった。

また、実験においては個体サイズに比し実験水槽がやや小さく、行動が制限されるおそれも否定できなかったが、実験中のテッポウエビはいずれも水槽壁面まで移動する行動が見られなかったことから、実験に用いた水槽はテッポウエビの行動を制限するものではないと判断した。

実験からテッポウエビは適応出来ない水質に対して逃避行動は示すが、継続的な遊泳能力が無いため遊泳しながら逃避することは出来ないと考えられる。

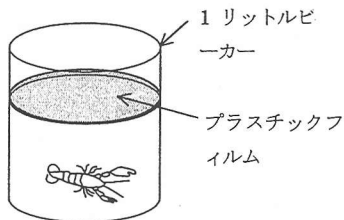


図-36 水温別酸素消費速度実験

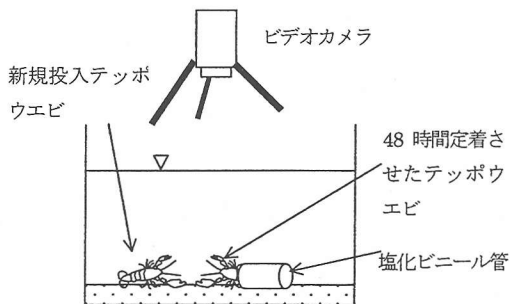


図-38 水温別発音数観測実験

(3) 水温が個体の酸素消費および発音数に与える影響

a) 水温による酸素消費の変化

一般に水温が水生生物に与える影響は大きいとされている。また実海域でのテッポウエビの調査でも水温に起因していると思われるパルス数の変化が見られた。そこで水温の変化による活性の変化を酸素消費速度の実験により検証した。

海水1リットルを入れたビーカーにテッポウエビを1個体投入し、水面は空気中からの酸素交換を防ぐためプラスチックフィルムで密閉し(図-36)、恒温槽(-10℃~60℃まで設定可能)内で実験をおこなった。実験に用いる海水は蓄養時と同様のもので、実験開始時のDOは7.0mg/L以上とし、実験中の水温は設定温度±1℃以内に保った。なおDOはハンディ溶存酸素メーター(HORIBA OM-12)により、ビーカーの底部で測定した。各水温でテッポウエビ10個体(甲長:1.75(SD=0.72)cm, 湿重量:5.08(SD=0.07)g)を用い実験をおこなった。馴致は別の水槽を用い24時間おこなった後、実験ビーカーに投入し、その後2時間での酸素消費速度を測定した。酸素消費速度は次のように定義する。

$$\text{酸素消費速度 (mg/L}\cdot\text{hr)} = (\text{2時間後 DO (mg/L)} - \text{実験開始時 DO (mg/L)}) / 2 \text{ (hr)} \quad (2)$$

10℃, 15℃, 20℃, 25℃, 30℃の各水温別の酸素消費速度を図-37に示す。

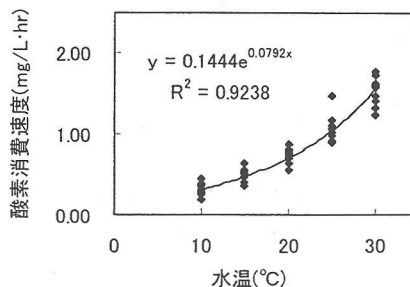


図-37 オニテッポウエビの水温別酸素消費速度

表-3 水温別パルス数観測実験

水温(°C)	パルス数(回/2hr)	威嚇回数(回/2hr)	総威嚇時間	塩化ビニール管通過回数(回)
15	1	1	1分07秒	2
20	18	44	12分28秒	56
25	35	60	10分07秒	134

*総威嚇時間は、ビデオ観察により威嚇行動をとったと見られた時間の合計である。

実験結果から水温が上昇するとともに指数関数的に酸素消費速度が増えており、水温の低下とともにエビの活性が落ちることが伺える。仮に発音が獲物の捕獲、縄張り争いに起因しているものとすれば、水温の低下に伴う活性の低下が冬期のパルス数減少の原因になっていることが考えられる。

b) 水温が発音数に与える影響

酸素消費実験からは、テッポウエビが水温の低下とともに活性を落としていることが判明したが、実際に水温の低下が発音にも影響するのか実験により確かめた。

テッポウエビは巣穴を掘って生活し、威嚇、攻撃のため発音していると考えられる。そのためまず水槽内でテッポウエビが発音しやすい環境づくりをおこなった。水槽(30cm×18cm×32cm)に径3.2φの塩化ビニール管を入れ、それを巣として定着させた後に、新たにエビを投入すると攻撃行動と共に発音を起こしやすいことが分かった。この作業を行わずに20個体を水槽内に入れて観測をおこなったが、テッポウエビの発音はほとんどみられなかった。これはテッポウエビがテリトリーを作れなかったためと考えられ、テッポウエビの発音は自らのテリトリー内の侵入者に対する攻撃にもなる行動であることが確認された。

実験方法は、砂を1cmほど敷き詰めた上記の水槽の中の塩化ビニール管内に、テッポウエビを48時間定着させた後、さらに1個体のテッポウエビを投入し、その後2時間ビデオ録画を行い、テッポウエビの行動の観察、発音数の計数をおこなった(図-38)。実験水槽は硫化水素耐性実験と同様に大

型浴槽に設置し、水温を調節した。

水温を15°C、20°C、25°Cに変化させた実験の結果を表-3に示す。

水温の変化に伴うパルス数の変動については顕著な結果が得られた。15°Cの時の発音は1回しか観測されなかったが20°Cでは18回、30°Cでは35回と水温が上昇するにつれて発音の増加がみられ、実海域での観測データにそう結果が得られた。また発音回数のみならず、威嚇行動や塩化ビニール管通過回数にも顕著な差がみられ、水温の低下と共にテッポウエビが活性を落としていることがわかる。なお15°Cの時初めに投入したテッポウエビは多くの時間をビニール管内で過ごし、ほとんど行動を起こさなかった。

実験は体長差がある2個体のテッポウエビを用いたが、実験中水槽内においては体長が大きいテッポウエビが常に優位を保ちビニール管を占拠していた。特徴的な行動パターンとしては塩化ビニール管に定着した後、ビニール管から出ては相手を攻撃してビニール管に戻るといったものである。これは自らのテリトリーを守ることを意識した行動とみられる。また攻撃中は必ず発音を伴うとは限らなかったが、発音は必ず攻撃中に起こしており、文献6)、7)の発音は攻撃や威嚇のためであるという記述を裏付ける結果が得られた。

実験からテッポウエビの発音は水温に大きく影響されることがわかった。パルス数は、個体数あるいは活性により変化すると考えられることから、現地調査の冬期パルス数の減少は、実験により活性の低下が要因であることが確かめられた。今後、適正な環境条件のもとでの水温別の発音回数が定量化できればテッポウエビの密度の推定を行うことが可能になると考えられる。

4. 結論

本研究では、海中発音生物として知られるテッポウエビのパルス数観測による浅海域底層環境モニタリングの可能性を検討した。

まず現地調査より、テッポウエビのパルス数は季節変化し、その変化は水温変化と相関が高いこと、比較的パルス数が変動しやすい時刻をさければ、2分間程度の録音調査でもその季節におけるパルス数の代表値が得られること、貧酸素水塊発生によりテッポウエビのパルス数が激減し、その回復には1ヶ月以上要すること、宇部港と博多湾という距離的に離れた地点においては、同じ水温でもパルス数に大きな隔りがあることを見いだした。

続いて室内実験より、テッポウエビの48時間半数致死DO濃度は約1.7mg/Lであること、40000 μ gS/Lの硫化水素濃度では2時間内に死亡が見られないこと、遊泳による逃避

能力は極めて小さいこと、水温低下にともなう酸素消費ならびにパルス数の低下が実験室でも再現できることを示した。

現段階では本手法は、定点調査において、水質汚濁の発生していない時期の水温とパルス数の関係を把握しておくことにより、貧酸素水塊のような水質汚濁に起因するパルス数の変化を検出することが可能であることが示された。また、一旦貧酸素にさらされたテッポウエビのパルス数の回復には時間を要するため、本手法を用いれば、過去1ヶ月程度の間に発生した水質汚濁が検出できることになる。

本手法は、ハイドロフォンで水中の音響を録音するだけであり、専門知識も必要なく1~2分で終了するという簡便性が最大の特徴である。しかし、海中には船舶航行や海中工事などの環境騒音が存在し、本論文で述べた解析手法では騒音の影響を除去しきれない場合もある。また、生物環境の評価手法として見た場合、パルス数と生息密度との関係が不明であることも問題である。そもそも、テッポウエビ属という限られた生物種で生物環境一般が論じられるのかという疑問もある。今後は、様々な環境騒音下でのパルスの計数方法を確立するとともに、水深、底質などパルス数に与える水温以外の環境条件の影響、パルス数とテッポウエビ生息密度との関係、他の生物とテッポウエビとの関係などを明らかにし、地点間の環境比較への応用の可能性ならびに生物量の直接測定法としての可能性を検討したい。

謝辞：調査にご協力頂いた九州環境管理協会条後氏、テッポウエビ採取にあたりご尽力頂いた床波漁港石田氏、調査、実験に協力してもらった上浦君、江上君、上田君にここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 安永 榮：海中発音生物の位置測定に関する研究—テッポウエビ音の音源強度と分布—、東京水産大学博士論文、1992。
- 2) J.Emmett Duffy：Eusociality in a coral-reef shrimp, *NATURE*. VOL381, 512-514, 1996.
- 3) Jon Seger and Nancy A.Moran：Snapping social swimmers, *NATURE*. VOL381, 473-474, 1996.
- 4) 林 健一：日本産エビ類の分類と生態(92)、海洋と生物、108, vol.19, no.1, pp.46-49, 1997.
- 5) Martin W.Johnson, F.Alton Everest, and Robert W.Young：The role of snapping shrimp (CRANGON AND SYNALPHEUS) in the production of underwater noise in the sea, *Boil.Bull.*, 93, pp.122-138, 1947.
- 6) Howard Schein：The role of snapping in ALPHEUS

- HETEROCHAELEIS say, 1818, The big-clawed snapping shrimp, *E.J.Brill, Leiden, Crustaceana*33(2), pp. 182-188, 1977.
- 7) Robert E.Knowlton and Jams M.Moulton : Sound production in the snapping shrimps ALPHEUS and SYALPHEUS, *Biol.Bull.*, 125, pp. 311-331, 1963.
 - 8) 山下欣二 : 宮島産テッポウエビの形態および生態, *動水誌* 25-3, pp. 60-65, 1983.
 - 9) 本田清一郎 : 福岡湾の底生動物群集の季節変化, *Bull.Fukuoka Fisheries Mar.Technol.Res.Cent.*, No. 1, March, pp. 189-198, 1993.
 - 10) James.N.Kremer and Scott W.Nixon : 沿岸生態系の解析, 生物研究社, pp. 35-38, 1987. 12.
 - 11) 魚類に対する毒性試験法, 農林省農政局長通達, 40 農政 B 第 2735 号, pp. 203-204, 1965.
 - 12) L.Pihl, S.P.Baden and R.J.Diaz : Effects of periodic hypoxia on distribution of demersal fish and crustacans, *Marine Biology* , 108, 349-360, 1991.
 - 13) 姜柱贊, 松田治, 今村憲史 : 児島湖における貧酸素と硫化水素の発生がテナガエビの生存に及ぼす影響, *Nippon Suisan Gakkai*, 61 (6), pp. 821-826, 1995.
 - 14) 日本海洋学会沿岸海洋研究部会 : シンポジウム, 貧酸素水塊, 沿岸海洋研究ノート, 26 (2), 1989.
 - 15) ROBERT J.DIAZ and RUTGER ROSENBERG : Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna, *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* 1995, 33, 245-303.
 - 16) 関根雅彦, 上浦慎太郎, 山本義男, 濱田悦之, 浮田正夫 : 沿岸開発にともなう貧酸素水塊発生がマコガレイの挙動に与える影響の実験的研究, *環境工学研究論文集*, Vol. 34, pp. 239-247, November 1997.
 - 17) 山本英幸 : 貧酸素水塊に対するカレイの行動の実験的研究 (その 2), 山口大学工学部卒業論文, 1997.

(1999. 1. 11 受付)

MONITORING OF SEA ENVIRONMENT BY USING SNAPPING SHRIMP

Moriyoshi WATANABE, Masahiko SEKINE, Yoshiyuki HAMADA and Masao UKITA

In this paper, we examine the validity of pulse count of snapping shrimps for sea environmental monitoring. Snapping shrimps exist everywhere in the World Sea, and they make peculiar strong pulse sounds. Pulse count can be achieved merely by recording their sounds for a few minutes by using a hydrophone without special biological knowledge. From field surveys and laboratory experiments, we found that the pulse count depends on water temperature when sea environment is normal, and it falls by the occurrence of oxygen-deficient water. The results show that this method can be a useful index of the effect of water pollution on benthic animals in fixed-point observation.